

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robototechniky

Návrh kola robotu s integrovanou pohonnou jednotkou

Design of a Robot Wheel with Integrated Driving Unit

Student:

Pavel Dolejší

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Mihola

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Dolejší**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R013 Robotika
Specializace: 70 Robotika
Téma: **Návrh kola robotu s integrovanou pohonnou jednotkou**
Design of a Robot Wheel with Integrated Driving Unit

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu současného stavu řešené problematiky.
2. Na základě této analýzy navrhnete možné varianty řešení a proveďte jejich srovnání.
3. Vybranou variantu detailně rozpracujte.
4. Práci doplňte podrobnou technickou a výpočtovou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému (dle pokynů vyučujícího).

Seznam doporučené odborné literatury:


- Kárník, L., Knoflíček, R., Marcinčin, J. N. Mobilní roboty. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.
- Schraft, R.F., Volz, H. Serviceroboter. Springer – Verlag, Berlin, 1996.
- Kárník, L. Robotizace v nestrojírenských oborech. VŠB-TUO, Ostrava, 2000, 66 s. ISBN 80-7078-739-2.
- ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

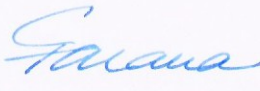
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Mihola**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011


prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísečné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011

Pavel Dabák

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....23.5.2011

.....*Pavel Dolejší*.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Dolejší

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kovalčikova 813
Petřvald

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DOLEJŠÍ, Pavel. *Návrh kola robotu s integrovanou pohonnou jednotkou*. Ostrava, 2011. 42 s. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí kola s integrovanou pohonnou jednotkou. V úvodu práce jsou rozebrány konstrukční možnosti a dostupné prostředky pro návrh kola robotu s integrovanou pohonnou jednotkou. Na základě rozboru je navrženo několik možných řešení konstrukce, vybrána optimální varianta a ta byla dále rozpracována. Výsledkem je konstrukční řešení kola robotu s využitím diskového motoru a harmonické převodovky. Součástí práce jsou potřebné výpočty a výkresová dokumentace.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DOLEJŠI, Pavel. *Design of a Robot Wheel with Integrated Driving Unit*. Ostrava, 2011. 42 p. Bachelor Thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics

Bachelor thesis is dealing with design of robot wheel with integrated drive unit. The beginning of thesis analyzes design options and available solutions for design of robot wheel with integrated drive unit. Based on the analysis are made several possible design solutions which are evaluated and optimal design is further developed. Result of the thesis is design solution of robot wheel using electric disc motor and harmonic drive. Necessary calculations and drawings are included

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
0 Úvod	9
1 Analýza současného stavu problematiky.....	10
1.1 Historie použití kol s integrovanou pohonnou jednotkou.....	10
1.2 Vlastnosti kol s integrovanými pohonnými jednotkami.....	14
1.3 Konstrukční možnosti.....	15
2 Požadavkový list:.....	18
3 Varianty řešení.....	19
3.1 Varianta č. 1:.....	19
3.2 Varianta č. 2:.....	21
3.3 Varianta č. 3:.....	23
3.4 Varianta č. 4.....	25
4 Hodnotová analýza	27
5 Konstrukční návrh optimální varianty	30
5.1 Konstrukce pohonné jednotky	31
5.2 Návrh kola	33
6 Výpočtová část:	34
6.1 Výkon a krouticí moment pohonné jednotky	34
6.2 Kontrola spojení mezi motorem a převodovkou – Hřídelového pera.....	37
6.3 Kontrola pevnosti šroubů uchycujících kolo k rámu robotu	38
7 Závěr	40
8 Seznam použité literatury	41
9 Seznam příloh	42

Seznam použitých značek a symbolů

F	Obvodová síla na hřídeli motoru	[N]
F_2	Síla otláčující bok pera	[N]
F_{ok}	Osová síla ve šroubu od klopného momentu	[N]
F_{om}	Maximální osová síla ve šroubu	[N]
F_{ot}	Osová síla ve šroubu zachycující tečnou sílu	[N]
F_t	Tečná síla od momentu	[N]
F_z	Zatěžující síla	[N]
HP	Harmonická převodovka	
I_i	Ideální převodový poměr převodovky	[-]
K	Koeficient zatížení HP	[-]
M_k	Trvalý požadovaný krouticí moment	[Nm]
M_{kmax}	Maximální požadovaný krouticí moment	[Nm]
M_m	Nominální krouticí moment motoru	[Nm]
M_{mmax}	Maximální krouticí moment motoru	[Nm]
M_p	Požadovaný krouticí moment motoru	[Nm]
M_{pmax}	Max. požadovaný krouticí moment na motoru	[Nm]
M_r	Nominální krouticí moment HP	[Nm]
P_h	Stoupání závitu	[mm]
P_p	Požadovaný výkon na motoru	[W]
R_e	Mez kluzu šroubu	[MPa]
V	Poměr skutečného a nominálního zatížení HP	[-]
b	Výška pera	[mm]
d	Průměr kola	[mm]
d_2	Střední průměr závitu	[mm]
d_3	Vnitřní průměr závitu	[mm]
d_h	Průměr výstupní hřídele motoru	[mm]
d_s	Průměr roztečné kružnice šroubů příruby kola	[mm]
f	Koeficient smykového tření	[-]
f_z	Koeficient tření v závitu	[-]
h	Počet voleb hodnotové analýzy	[-]
i	Převodový poměr HP	[-]
k	Koeficient bezpečnosti třecí vazby	[-]

k_s	Koeficient bezpečnosti šroubového spoje	[-]
l	Šířka (osová délka) kola	[mm]
l_p	Délka pera ve spoji	[mm]
l_p^*	Rovná délka pera ve spoji	[mm]
n_k	Požadované otáčky kola	[min ⁻¹]
n_m	Nominální otáčky motoru	[min ⁻¹]
p_2	Tlak na pero	[MPa]
p_{D2}	Dovolený tlak na pero	[MPa]
q	Váha významnosti kritéria	[-]
s	Rozteč šroubů příruby kola	[-]
t_1	Výška pera v náboji	[mm]
v	Požadovaná obvodová rychlost kola	[m/s]
η_l	Skutečná účinnost HP	[%]
η_{lmax}	Skutečná účinnost HP při max. zatížení	[%]
η_r	Účinnost HP při nominálním zatížení	[%]
τ	Smykové napětí ve šroubu	[MPa]
τ_s	Střížné smykové napětí v peru	[MPa]
τ_{Ds}	Dovolené střížné napětí v peru	[MPa]
σ	Smykové napětí ve šroubu	[MPa]
ω	Požadovaná úhlová rychlost kola	[s ⁻¹]

0 Úvod

Velmi rychlý rozvoj strojní i výpočetní technologie v posledních letech přispěl k prudkému rozvoji mnoha oblastí a jednou ze světově nejvíce diskutovaných je právě robotika. Nejznámější podobou robotiky jsou průmyslové roboty, které se během mnoha let osvědčily v široké řadě odvětví. Přesto zdaleka nepředstavují nejrychleji se rozvíjející oblast robotiky. Toto prvenství patří robotice servisní.

Servisní roboty pokrývají velmi širokou oblast využití a téměř každý den se stává tato oblast ještě širší, proto vznikají i roboty nejrůznějších tvarů a funkcí. Co má však většina z nich společné je nějaký druh mobility. Existují roboty kráčející, létající, plavající i šplhající, nejčastějším typem robotů ale jsou pro svou jednoduchost a energetickou úspornost roboty jezdící - kolové.

Kolové roboty patří k poměrně starým ale velmi osvědčeným konstrukcím. Protože se dnes kola a kolové konstrukce používají téměř všude, mohou kolové roboty přejímat celou řadu poznatků z jiných odvětví, což jen pomáhá jejich rozšíření. I přes podobnost například s automobily jsou ale obvykle na kolové roboty kladeny velmi specifické požadavky, kvůli kterým je nutné hledat vlastní řešení.

Téměř u všech mobilních robotů je kladen požadavek na minimální hmotnost a rozměry při co nejvyšším výkonu. Zmenšení rozměrů přitom nesmí jít na úkor neseného nákladu či vybavení. Rovněž je zapotřebí maximální pohyblivost robotu, ideálně pomocí maximálního dostupného výkonu na všech kolech robotu. Protože jsou roboty nasazovány do nejrůznějších prostředí, měly by být rovněž co nejspolehlivější, snadno udržitelné i opravitelné. V neposlední řadě hraje roli samozřejmě jednoduchost, protože roboty se obvykle vyrábějí v malých sériích a složité vnitřní mechanismy by se nepříznivě odrazily na ceně.

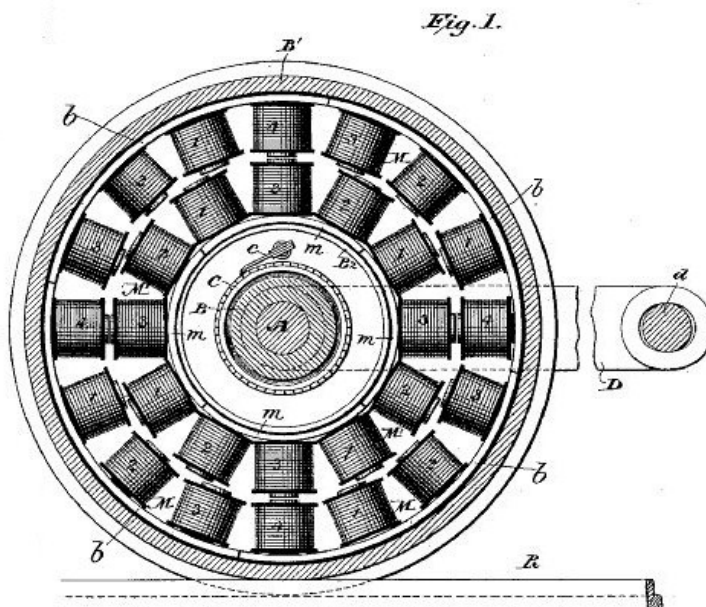
Všechny tyto požadavky splňují kola s integrovaným pohonem, která jsou tématem této práce. Úvodní část práce se věnuje přehledu existujících řešení a možností konstrukce, včetně rozboru vlastností kol s integrovanou pohonnou jednotkou. Ve střední části je zpracována čtveřice návrhů kol středního výkonu dle zadaných požadavků a následně je jedna z variant vybrána a v závěrečné části práce dále rozpracována.

1 Analýza současného stavu problematiky

1.1 Historie použití kol s integrovanou pohonnou jednotkou

Už od počátku vývoje vozidel s vlastním pohonem se řešilo, kam nejvýhodněji umístit samotný pohonný systém. U prvotních konstrukcí využívajících ještě parní pohony nebylo vzhledem k rozměrům parního stroje na výběr mnoho možností. S postupným vývojem menších a výkonnějších spalovacích a především elektrických motorů na konci 19. Století se však možnosti značně rozšířily.

Jedním z nejvýhodnějších možných umístění motoru se už tehdy jevilo zabudování motoru do kol vozidla. Důvodem byla jednak snaha o úsporu místa a jednak snížení polohy těžiště celého vozidla. Byly zkoušeny nejrůznější konstrukce, do kol se zkoušely zabudovávat motory elektrické i spalovací, ačkoliv spalovací motory se kvůli mechanické složitosti příliš neujaly. První automobil vybavený elektrickými motory zabudovanými v kolech vyjel již v roce 1890 (Obr. 1) a brzy byl následován dalšími typy obdobné koncepce [1]. Vzhledem k malému výkonu tehdejších motorů a celkovému ústupu elektromobilů ve prospěch vozů vybavených spalovacími motory ale vývoj kol s integrovanými pohonnými jednotkami na dlouho dobu prakticky ustal.



Obr. 1

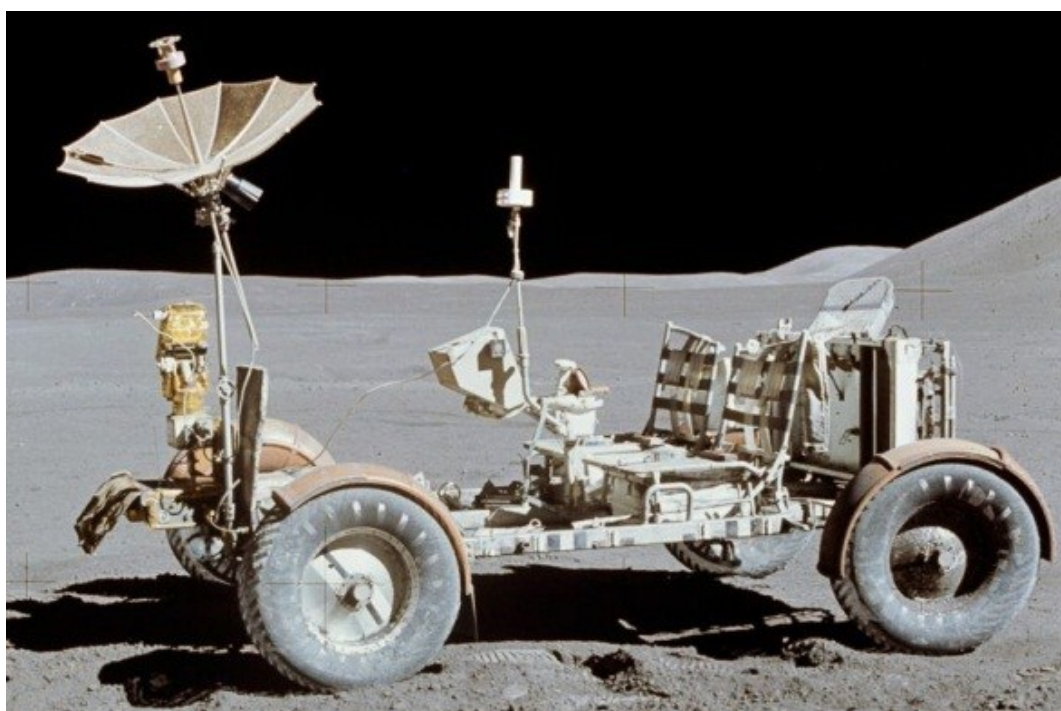
V průběhu 20. století byla koncepce pohonné jednotky v kole vozidla několikrát znovu uplatněna, nikdy však nedosáhla významnějšího rozšíření. Hlavní příčiny byly stále stejné, a sice nízké výkony vhodných motorů, obtížná regulace elektrických pohonných jednotek a v neposlední řadě vysoká cena. K významnější změně situace došlo až na konci šedesátých let s rychlým rozvojem výzkumu vesmíru a především závodem o „dobyetí měsíce“.

Vzhledem k obrovské náročnosti dopravy nákladu na měsíc se nízká hmotnost a minimální rozměry staly tehdejší hlavní prioritou. K tomuto se kola vozidel s integrovanou pohonnou jednotkou výborně hodila a ve spojení s rychlým rozvojem elektroniky, pohonných systémů a téměř bezedných fondů na výzkum vesmíru se stala jasnou volbou pro budoucí měsíční vozidla. Shodou okolností je první významnější použití integrovaných pohonných jednotek spjato s tehdy velmi mladou a velice perspektivní robotikou, neboť prvním vozidlem na měsíci vybaveným koly s integrovanou pohonnou jednotkou (respektive prvním vozidlem na měsíci vůbec) se v roce 1970 stal Sovětský dálkově ovládaný robot Lunochod 1 [2] (Obr. 2). Lunochod 1 byl vybaven osmi koly s integrovaným pohonem, zavěšenými vždy po dvojicích na kyvném rámu spojeným s konstrukcí robotu. Řízení směru robotu bylo smykové.



Obr. 2

Ze strany USA se prvním měsíčním vozidlem stal v roce 1971 Lunar Roving Vehicle [3], zkráceně Rover (Obr. 3). Na rozdíl od Lunochodu nešlo o robota, ale „jen“ o měsíční vozidlo pro astronauty, se kterými se na povrch měsíce dostal poprvé s Apollem 15. Z konstrukčního hlediska šlo o velice jednoduché vozidlo, díky své čtyř kolové konstrukci připomínající automobil. Důležitý fakt nicméně je, že stejně jako u Lunochodu byly všechny čtyři kola vybaveny samostatnou pohonnou jednotkou. Tu tvořil elektrický motor o výkonu 190W ve spojení s harmonickou převodovkou s převodovým poměrem 1:80 (šlo o první praktické použití harmonických převodovek). Na rozdíl od Lunochodu už ale byly všechny čtyři kola plně řiditelné pomocí jejich natáčení dalším elektrickým motorem.



Obr. 3

S koncem vesmírného závodu bohužel opět upadá zájem o kola s integrovanými pohony. Přestože možnosti uplatnění by byly široké, nízké výkony tehdejších elektrických motorů v poměru k jejich rozměrům a především vysoká cena omezily užití na pouze malé množství projektů, převážně menších vozidel.

Skutečná renezanse pohonných jednotek integrovaných do kol vozidel přišla až s koncem 90. let a začátkem 21. století jako přímý důsledek dalšího vývoje elektrických motorů a řídicích systémů. V souvislosti s obnoveným zájmem o elektrická vozidla postupně vzniklo mnoho návrhů kol s integrovanými pohonnými jednotkami, byla zkonstruována celá řada prototypů a ve vybraných oblastech se tento systém stal již téměř standardem (např. jízdní kola...). Ve většině případů však jde o speciální typy motorů či rovnou celistvé jednotky kola s motorem.



Obr. 4

Největší objemy financí jdou pochopitelně ze strany automobilového průmyslu (Obr. 4), protože v oblasti elektromobilů se očekává velký růst prodeje. Automobilky, které zvládnou technologii integrace motorů do kol, budou mít díky úspoře místa velkou výhodu proti ostatním, což činí z technologie jako takové lukrativní investici.

V oblasti robotiky je zájem o technologii rovněž velmi vysoký. Vzhledem k vysokým cenám mobilních robotů a převážně kusové výrobě není do technologie vkládáno tolik financí, praktické výhody, které kola s integrovaným pohonem přinášejí, jsou ale téměř identické. S motory v kolech už nyní počítá mnoho konstrukcí mobilních robotů a do budoucna je možné očekávat pouze růst zájmu o technologii.

1.2 Vlastnosti kol s integrovanými pohonnými jednotkami

Z integrace pohonu do kola plyne celá řada výhod. Nejpatrnější z nich je **prostorová nenáročnost a jednoduchá konstrukce vozidla**. Protože je celý mechanismus skryt v kolech, v ideálním případě končí povinnosti konstruktéra u přírub na rámu. Nemusí řešit, kam umístit motor, kudy vést hnací hřídele a může lépe využít vnitřní prostor robotu. Navíc toto umístění motoru je výhodné i z hlediska **umístění těžiště**. Celá hmota pohonu je umístěna velice nízko nad zemí a rovnoměrně po okrajích vozidla/robotu. Dále protože má každé kolo svůj vlastní motor, dá se velice jednoduše **řídit každé kolo zvlášť**, podle aktuální potřeby. Tím odpadá potřeba například diferenciálů a velmi se zlepšuje pohyblivost samotného vozidla. Zvláště u automobilů, přeneseně však i u robotů by se zjednodušila práce stabilizačních systémů. Poslední nezanedbatelnou výhodou této konstrukce je celková **modularita** výsledného vozidla. Protože pohonná jednotka neklade na konstrukci robotu prakticky žádné požadavky, je možné při vhodné konstrukci rámu poměrně jednoduše měnit počet či konfiguraci kol aniž by bylo nutné provádět rozsáhlé úpravy konstrukce podvozku. Toto se v robotice příznivě projeví i v opravitelnosti robotů. Pokud by během provozu robotu došlo jakýmkoliv způsobem k poškození nebo zničení jednoho kola, je možné robota velmi rychle opravit prostou výměnou celé jednotky kola.

Jako vše ale toto uspořádání trpí i nevýhodami. Kromě již zmiňované **finanční náročnosti** je to hlavně **omezená dostupnost vhodných pohonných jednotek**. Všeobecně bývá snaha kola tvořit s co nejmenší šířkou a při co největším průměru ve snaze o co nejmenší valivý odpor. Bohužel toto je v přímém rozporu s tradičním přístupem ke konstrukci elektrických motorů. Ty bývají kvůli omezení setrvačných momentů obvykle válcové konstrukce s malým průměrem a naopak velkou délkou. Úzké diskové motory jsou i dnes spíše okrajovým zbožím.

Další nevýhody plynou z konstrukčního uspořádání. To že je pohonná jednotka v kole totiž znamená, že je **vystavena veškerým vibracím**, kterým je vystaveno kolo. To má negativní vliv především na životnost ložisek nebo mechanických převodovek. Teoreticky sice je možné pohonnou jednotku spojit s kolem přes tlumiče, vzhledem k omezenému prostoru však toto není časté. Další nevýhodou jsou **vyšší nároky na řízení robotu**. Protože má každé kolo vlastní motor, je nutné zajistit pro každé z nich přesně stejnou rychlost otáčení. Pokud by se kola otáčela různou rychlostí, nutně by docházelo k prokluzům kol a tím jednak

ke zhoršení celkových adhezních poměrů, a jednak by robot mohl samovolně začít měnit směr. S rostoucím počtem kol závažnost této nevýhody stoupá. Navíc s možností prokluzů vzniká ještě další problém, a sice **obtížné měření skutečné polohy kola vůči terénu**. Pokud se začne kolo protáčet, přestává platit pravidlo, že odvalený obvod se rovná ujeté vzdálenost. Pokud by s tímto řídicí systém nepočítal, dostával by zcela mylné údaje o poloze a pohybu robotu.

1.3 Konstrukční možnosti

Pokud pomineme specializované účelové konstrukce, je možné konstrukci každé jednotky kola s integrovanou pohonnou jednotkou rozdělit na dvě funkční části. Pohonnou jednotku zajišťující pohyb kola, a samotné kolo přenášející krouticí moment a transformující jej v pohyb robotu. Vazba mezi těmito dvěma částmi může mít různý charakter a závisí na provozních požadavcích.

Toto základní rozdělení je dále využito a jednotlivé části jsou rozebrány samostatně.

Pohonná jednotka:

Srdcem pohonné jednotky je samozřejmě **motor**. Funkční princip motoru může být téměř libovolný, teoreticky je možné použít tekutinové rotační motory i tepelné - spalovací motory, z praktických důvodů se však používají téměř výhradně motory elektrické. Z elektrických motorů je možné volit motory stejnosměrné komutátorové i bezkomutátorové, torzní elektromotory stejnosměrné i střídavé i trojfázové střídavé motory synchronní a asynchronní. Protože jsou mobilní roboty většinou napájeny z baterií, je výhodné použít motorů stejnosměrných. S moderními řídicími systémy však je možné použít i na mobilním robotu střídavé pohony, je-li to výhodné.

S ohledem na jednoduchost řízení je výhodné použít klasického komutátorového stejnosměrného motoru. Z hlediska ztrát na komutátoru však je lepší použít motoru bezkomutátorového, respektive střídavého synchronního. Vzhledem k funkčnímu principu synchronního motoru by se navíc jednoduše vyřešil problém stejné rychlosti různých kol. Naopak asynchronní motory vhodné nejsou, protože neumožňují dobrou regulaci při nízkých rychlostech otáčení.

Zajímavou alternativu ke klasickým motorům představují mnohopólové torzní motory. Jde o motory s velmi pomalou rychlostí otáčení ale velkým krouticím momentem, čehož by šlo využít pro přímý pohon kola bez vložené převodovky.

Kromě funkčního principu se elektromotory liší i svým konstrukčním uspořádáním. Rozlišujeme nejčastější typy jako válcové a diskové. Válcové motory jsou jednoznačně nejčtenějším typem motoru. Vyznačují se malým průměrem a velkou osovou délkou což plyne ze snahy o minimalizaci setrvačného momentu rotoru. Kvůli své velké délce jsou ale pro integraci do kola motoru většinou nevhodné.

Mnohem vhodnější jsou motory diskové, které mají naopak velký průměr a velmi malou osovou délku. Oproti klasickým válcovým motorům mají vinutí i magnety uloženy v rovině kolmé na osu otáčení což sice přináší vyšší setrvačný moment motoru, ale ten je bohatě vykoupěn rozměry.

Kromě uspořádání se mohou motory lišit ještě svou skříní, respektive její absencí. Klasické motory bývají uzavřenými jednotkami s vlastní skříní a rotorem uloženým v ložiscích. To je výhodné s ohledem na jednoduchou montáž motoru. Alternativou ke skříňovým motorům jsou frameless motory. Ty nemají ani skříň ani ložiska, většinou jsou dodávány jen jako holé cívky vinutí. Jejich použití je konstrukčně mnohem složitější, ovšem je vyváжено menšími rozměry a hmotností.

Protože má většina elektrických motorů vysoké otáčky a nízký krouticí moment, je výhodné vložit za něj **převodovku**. Převodovek je opět velké množství typů a konkrétní typ je nutné volit podle požadovaného převodového poměru. Důležitý ale je výsledný rozměr převodovky, především její osová délka. Je-li to možné, je vhodné volit převodovku s co nejmenším počtem stupňů a to i za cenu vyšších nákladů a menší účinnosti. Pro nízké převodové poměry je možné volit převodovky planetové, pro vyšší cykloidní a pro nejvyšší převodovky harmonické.

Třetí důležitou částí pohonné jednotky je **nosné ložisko**. Je možné použít klasickou dvojici ložisek, z prostorových důvodů ale je výhodnější využít jednoho ložiska se zkříženými válečky, které zachytí i klopné momenty. Velikost ložiska je nutné nadimenzovat podle očekávané zátěže. S výhodou je možné použít převodovek s integrovaným nosným ložiskem, které nabízí někteří výrobci.

Kromě hlavních částí by se v pohonné jednotce měly nacházet čidla polohy a rychlosti důležitá pro řízení, volitelně pak i další **čidla**, například tepelné čidlo. Dále je nutné jednotku kola nějak brzdít. To lze řešit vložím samostatné mechanické nebo elektromagnetické **brzdy**, s výhodou ale je možné použít i brzdění přímo motorem.

Celá pohonná jednotka bude plně vystavena vlivu prostředí, proto je nutné ji konstruovat se zvýšenou odolností vůči vlhkosti a nečistotám. Konkrétní žádanou odolnost je nutné stanovit z podmínek nasazení.

Kolo:

V oblasti návrhu kola jsou možnosti mnohem širší, protože zde téměř nejsou žádná omezení. Je možné zkonstruovat kolo zcela vlastní konstrukce nebo využít částečně či výhradně komerčních výrobků. Kolo může být pevně spojeno s pohonnou jednotkou i řešeno jako výměnné. Jediné skutečné omezení konstrukce kola plyne z požadavkového listu a z možnosti připojení na pohonnou jednotku.

Obecně je vhodné konstruovat kola užší a s větším průměrem kvůli minimalizaci valivého odporu. Do těžkého terénu se ale naopak hodí spíše kola širší. Proto je důležité, jestli se robot bude pohybovat v jednom druhu prostředí, nebo bude univerzální a je nutné přizpůsobení kola různým terénům. Přizpůsobivost terénu je možné řešit buď výměnitelností kola, nebo jednodušeji použitím nafukovacích kol s možností regulovat tlak podle terénu. Obě možnosti je možné kombinovat.

2 Požadavkový list:

Pro konkrétní návrh jednotky kola s integrovanou pohonnou jednotkou byly stanoveny tyto požadavky:

- Integrace pohonné jednotky do kola
- Minimální šířka jednotky – šířka robotu do 77cm
- Maximální krouticí moment 185Nm
Trvalý krouticí moment 75Nm
- Rychlost robotu 3 km/h
- Zvýšená odolnost proti vodě a nečistotám
- Malá hmotnost
- Nízká cena

Původně byla požadována vyšší rychlost robotu 5m/s, protože však zatím nejsou dostupné dostatečně malé a lehké motory které by splňovaly požadavky, byla rychlost robotu po konzultaci s vedoucím práce snížena na současnou hodnotu 3km/h (0,833m/s).

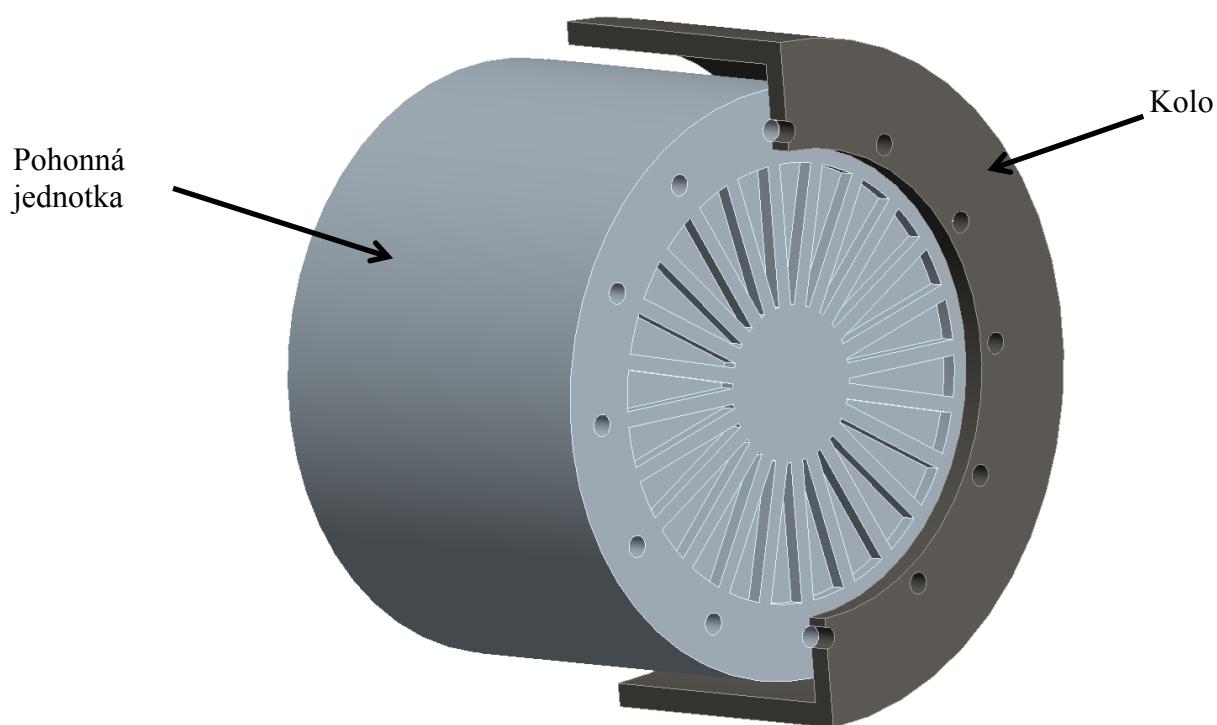
3 Varianty řešení

Dle požadavkového listu byly zpracovány čtyři varianty řešení.

Variantnímu řešení podléhala především pohonná jednotka sestavy kola, protože právě ta určuje hlavní parametry celé sestavy. Konstrukce samotného kola je z větší části stejná pro všechny varianty, a proto zde nebude více rozebírána. Jeho konstrukční řešení bude uvedeno v některé z dalších kapitol.

3.1 Varianta č. 1:

Přímý pohon kola elektromotorem bez převodovky - Kompletní kupovaná jednotka e-Traction



Obr. 5

Konstrukčně nejjednodušší možná varianta. V pohonu nejsou žádné převody, kolo je pevně spojeno s rotorem motoru. Chybějící převodovka by měla přinést především konstrukční zjednodušení a teoreticky i úsporu místa. Na druhou stranu větší požadavky na krouticí moment motoru znamenají větší hmotnost i rozměry motoru.

V této konkrétní variantě byla použita již hotová, komerčně prodávaná pohonná jednotka e-Traction SM350/1 [4]. Je primárně určena pro menší automobily a jiné dopravní prostředky. Má už v sobě integrovány nosné ložiska i potřebné snímače a je postavena se zvýšenou odolností vůči vlhkosti a nečistotám. Díky toho by bylo možné celou jednotku brát jako „black box“ a konstrukční práci omezit pouze na konstrukci kola a jeho uchycení na přírubu motoru.

Parametry pohonné jednotky plynou z jejího určení pro osobní automobily. Pro naše použití je výkonově (150Nm) a hlavně rychlostně (437ot/min) předimenzovaná, jde však o nejmenší výrobcem nabízenou jednotku. Vyšší výkon by však znamenal rovněž větší možnosti po stránce mobility robotu. Daní za vysoký výkon a předimenzování ale je velmi vysoká hmotnost jednotky – 85kg.

Tabulka parametrů [5]:

e-Traction SM350/1

Napětí	48-240V
Otáčky (při 48V)	437ot/min
Výkon	6kW
Proud	150A
Trvalý krouticí moment	150Nm
Maximální otáčky	2500 ot/min
Průměr	378mm
Šířka	275mm
Krytí	IP54 nebo vyšší
Maximální zatížení	2,5t
Nominální zatížení	1,5t

Tab. 1

Výhody:

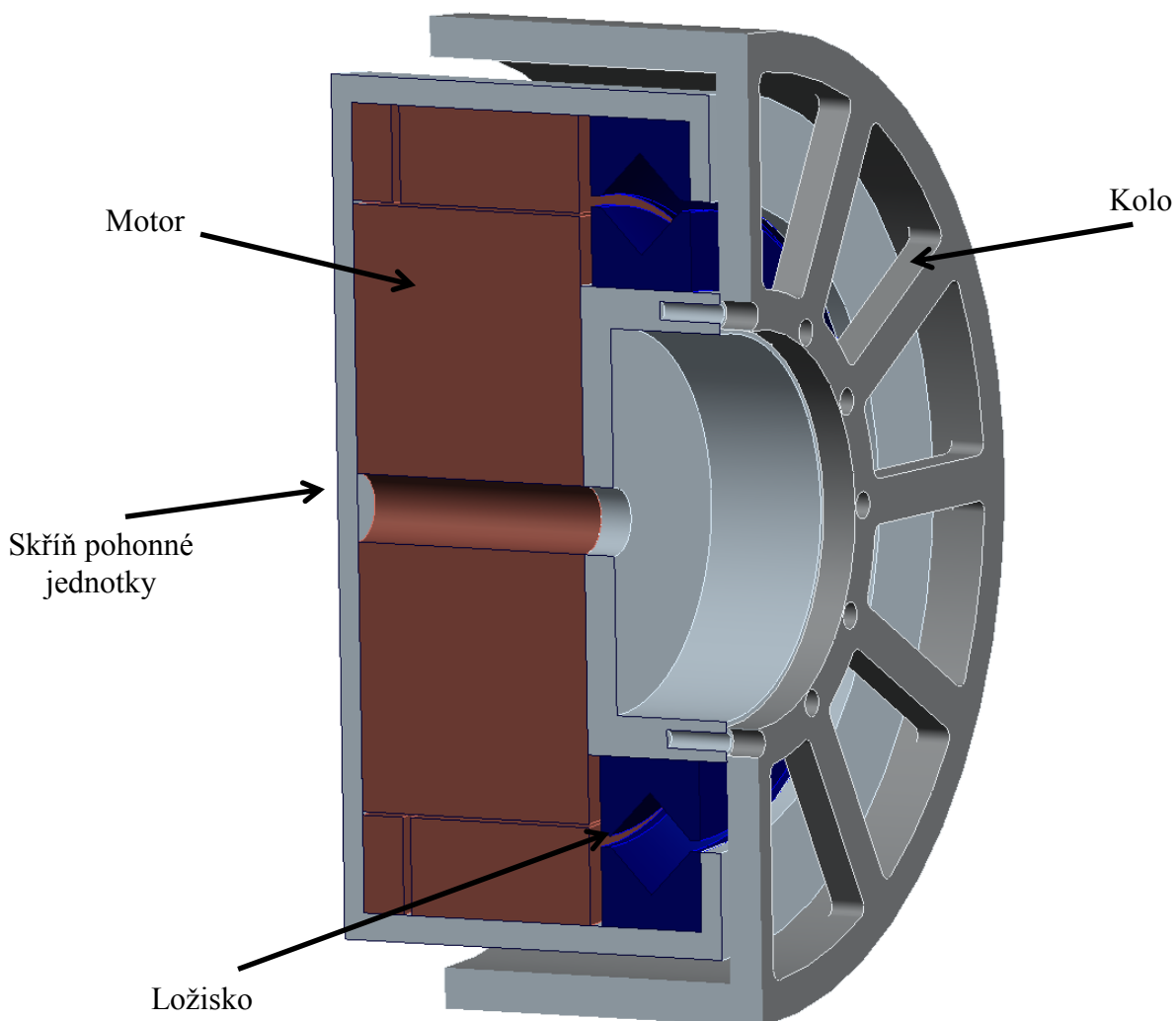
- Vysoký trvalý i maximální krouticí moment
- Vysoká rychlost robotu (33km/h)
- Jednoduchost konstrukce

Nevýhody:

- Vysoká hmotnost
- Vysoké požadavky na napájení
- V porovnání s ostatními variantami velká šířka.

3.2 Varianta č. 2:

Přímý pohon kola elektromotorem bez převodovky - Torzní DC frameless motor Kollmorgen



Obr. 6

Z funkčního hlediska jde o stejné řešení jako v předchozí variantě. Opět je kolo poháněno přímo motorem bez použití převodovky. Zatímco v předchozí variantě byl použit hotový kupovaný modul pohonné jednotky, v této variantě je pohonná jednotka vlastní konstrukce. Vlastní konstrukce pohonné jednotky znamená především lepší přizpůsobení požadovaným parametrům a tím snížení hmotnosti i rozměrů. Daní za vlastní konstrukci je větší složitost jednotky.

Základem pohonné jednotky je torzní komutátorový DC frameless motor od společnosti Kollmorgen, konkrétně typ QT-12505 [6]. Jde o plochý, stejnosměrný motor válcové konstrukce využívající magnety ze vzácných zemin. Konstrukčně je pro něj typické mnohopólové „torzní“ uspořádání, díky kterého má velmi nízké otáčky při vysokém krouticím momentu.

Protože jde o frameless motor, jeho součástí není skříň ani ložiska. Proto je v sestavě doplněn o jedno ložisko se zkříženými válečky a celek je uzavřen ve skřini pohonné jednotky. Ve skřini se rovněž nacházejí potřebné snímače rychlosti a polohy. Přibližná šířka kompletní pohonné jednotky je 180mm při hmotnosti 40kg.

Tabulka parametrů motoru: [7]

Kollmorgen QT-12505

Rychlost otáčení	4rad/s (38,2ot/min)
Výkon	1100W
Špičkový krouticí moment	271Nm
Průměr	356mm
Šířka	114mm
Hmotnost	30kg

Tab. 2

Výhody:

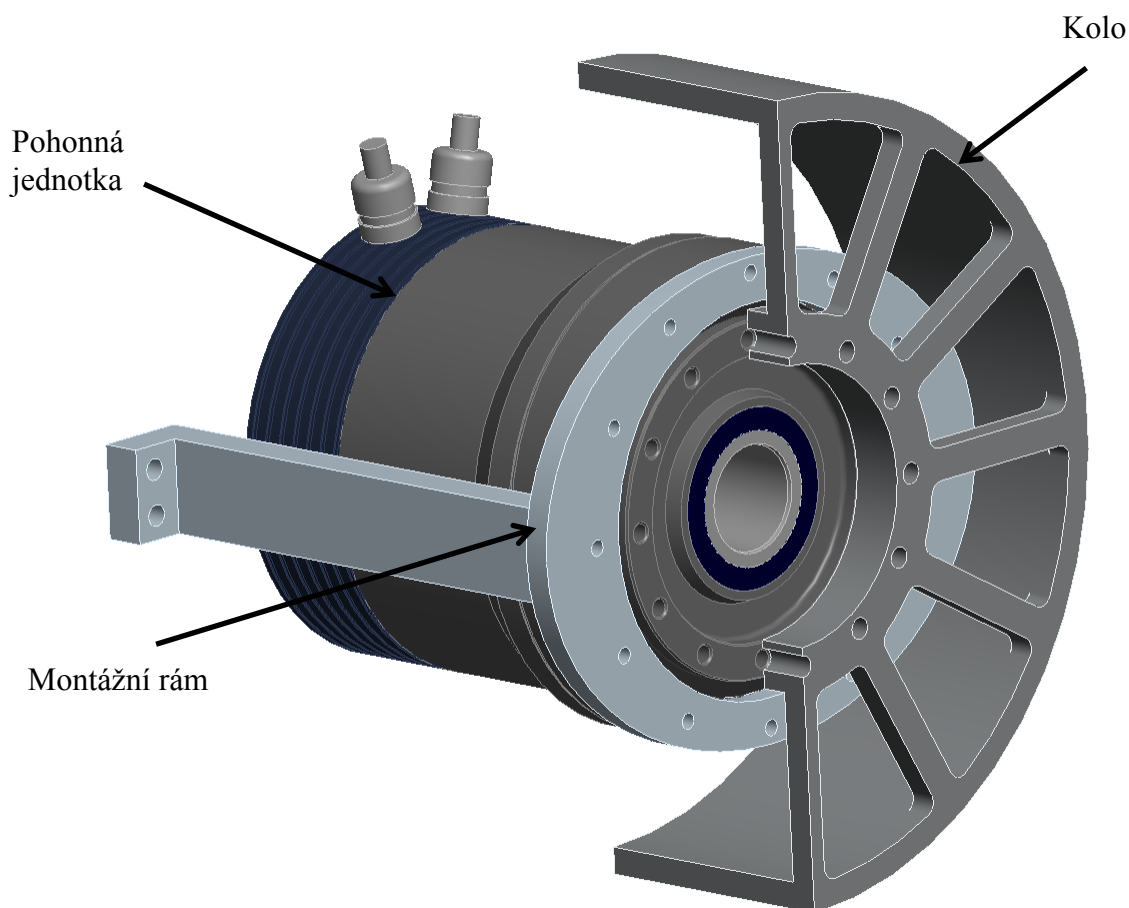
- Velký krouticí moment i při nízkých otáčkách
- Jednoduchá říditelnost
- Možnost přizpůsobit konstrukci speciálním požadavkům

Nevýhody:

- Složitost
- Vysoká hmotnost
- Nízká maximální rychlost

3.3 Varianta č. 3:

Pohon kola motorem s harmonickou převodovkou - Kompletní kupovaná jednotka Harmonic Drive



Obr. 7

První varianta s převodovkou. Pohonná jednotka je tvořena motorem spojeným s harmonickou převodovkou, která redukuje jeho otáčky na otáčky kola. Harmonická převodovka byla volena s ohledem na nízkou požadovanou výstupní rychlost otáčení a zároveň s ohledem na malé rozměry. Díky vysokého převodového poměru převodovky je možné použít relativně malý a lehký motor.

V této konkrétní variantě byl použit, podobně jako ve variantě 1, hotový, komerčně prodáváný modul pohonné jednotky od společnosti Harmonic Drive, konkrétně typ CHA-40A-50 [8]. Tato jednotka obsahuje bezkomutátorový motor, harmonickou převodovku, nosné ložisko se zkříženými válečky a absolutní optický enkodér pro snímání polohy kola.

Zvláštností jednotky je dutá hřídel procházející celou její délkou. Přestože variantní návrh nepočítá s využitím této vlastnosti, v případě reálného nasazení na robotu by ji bylo možné využít například pro vedení ke snímačům v kolech.

Protože má jednotka obě montážní příruby na jedné straně, Je doplněna o montážní rám spojující ji s rámem robotu

Tabulka parametrů pohonné jednotky [8]:

Harmonic Drive CHA-40A-50

Převodový poměr	50
Max. krouticí moment	402Nm
Trvalý krouticí moment	125Nm
Max. výstupní otáčky	80 ot/min
Průměr	180mm
Šířka	177mm
Krytí	IP65
Přípustné radiální zatížení ložiska	27,5kN
Hmotnost	12kg

Tab. 3

Výhody:

- Malé rozměry
- Nízká hmotnost
- Jednoduchost

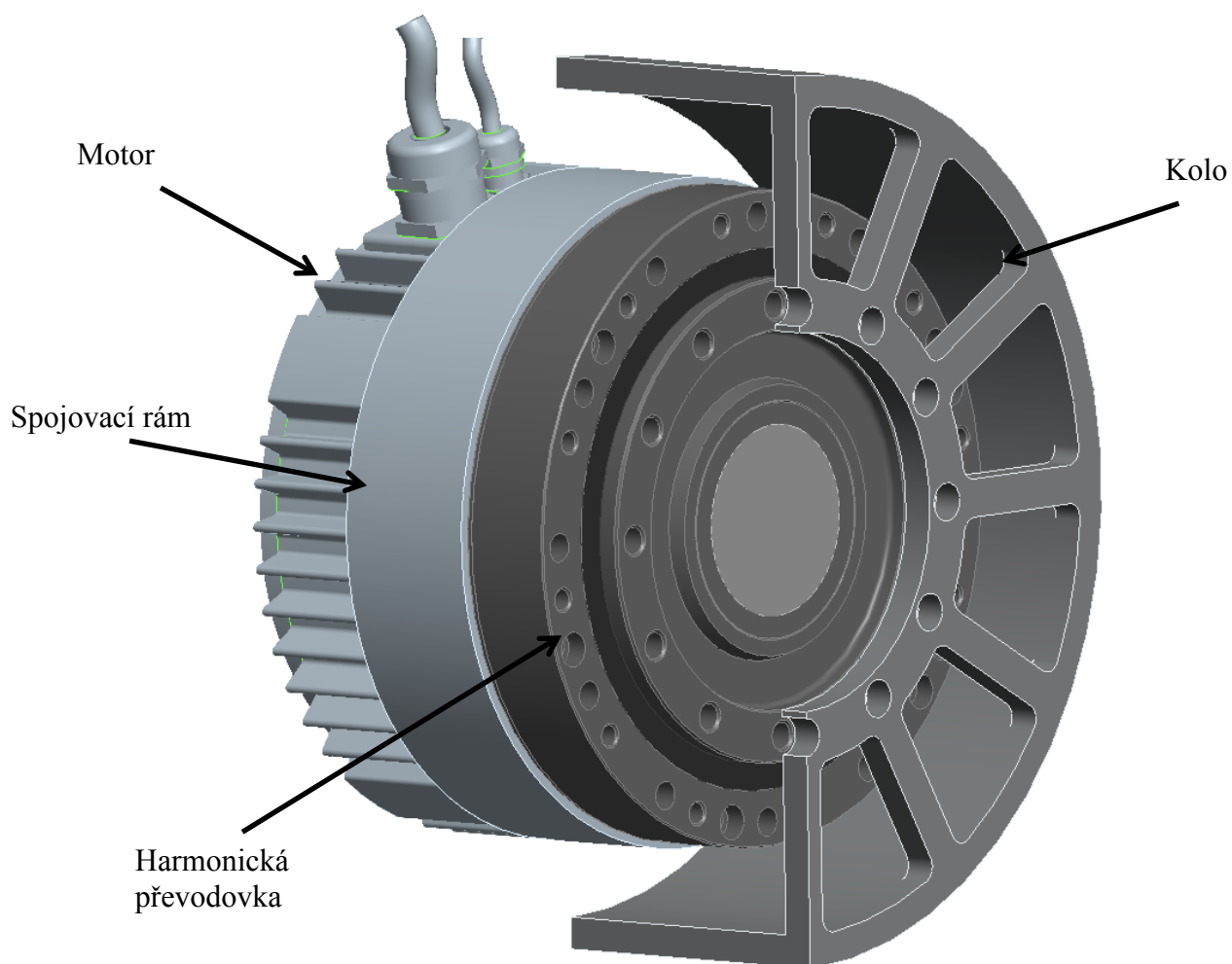
Nevýhody:

- Složitější řízení
- Příruby na jedné straně

3.4 Varianta č. 4

Pohon kola motorem s harmonickou převodovkou -

Diskový motor Heinzmann a harmonická převodovka Harmonic Drive



Obr. 8

Tato varianta je opět funkčně identická k předchozí variantě. Jde o diskový motor kombinovaný s harmonickou převodovkou, tentokrát ale jako sestava jednotlivých dílů. Pohonná jednotka se skládá ze tří hlavních částí. Diskového motoru Heinzmann, harmonické převodovky Harmonic Drive a spojovacího rámu který propojuje motor s převodovkou a zároveň uzavírá vnitřní prostor.

Motor Heinzmann SL-EC 120-11B [9] je stejnosměrný, bezkomutátorový diskový motor s jednostranným rotorem a statorem. Uvnitř skříně motoru se nacházejí čidla polohy (hallový sondy) i teploty.

Harmonická převodovka Harmonic Drive CPU-M 45-50 [10] je hrníčkovým typem harmonické převodovky bez průchozí duté hřídele. Její součástí je ložisko se zkříženými válečky, které slouží jako hlavní nosné ložisko kola.

Tabulky parametrů:

Heinzmann SL-EC 120-11B

Napětí	24-560V
Výkon (při 3000ot/min)	0,8kW
Trvalý krouticí moment	2,5Nm
Max. krouticí moment	10Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min
Průměr	210mm
Šířka	53mm
Krytí	IP54
Hmotnost	5,5kg

Tab. 4

Harmonic Drive CPU-M 45-50

Nom. krouticí moment (při 2000ot/min)	176Nm
Max. krouticí moment	950Nm
Limit vstupní rychlosti	3600ot/min
Přípustné radiální zatížení ložiska	34,6kN
Přípustné axiální zatížení ložiska	52,3kN

Tab. 5

SL-EC120-11B + CPU-M 45-50

Trvalý krouticí moment	90Nm
Max. krouticí moment	375Nm
Výstupní rychlost otáčení	60ot/min
Šířka	140mm
Hmotnost	16kg

Tab. 6

Výhody:

- Malé rozměry
- Nízká hmotnost

Nevýhody:

- Složitější řízení

4 Hodnotová analýza

Hodnotová analýza je metoda výběru optimální varianty. K jejímu provedení je třeba zvolit kritéria a jim přiřadit číselnou hodnotu podle bodové stupnice hodnocení.

Hodnotová analýza bude provedena dle [11]

Kritéria rozhodování:

	Kritérium	Popis
K1	Šířka kola	Celkový rozměr ve směru osy otáčení kola
K2	Ø pohonné jednotky	
K3	Hmotnost	
K4	Složitost konstrukce	Počet dílů a vazeb mezi nimi
K5	Řiditelnost	Požadavek na vyspělost řídicího systému

Tab. 7

Zhodnocení kritérií pro jednotlivé varianty:

Bodovací systém:

Vysoká úroveň	5
Dobrá úroveň	4
Průměrná úroveň	3
Nízká úroveň	2
Nevyhovující úroveň	1

Tab. 8

Hodnocení kritérií:

	V1	V2	V3	V4
K1	2	3	3	5
K2	2	2	5	4
K3	1	2	4	4
K4	5	2	4	3
K5	1	4	3	3

Tab. 9

Určení významnosti kritérií:

Pro určení použijeme metodu porovnávání v trojúhelníku párů.

Pro výpočet váhy významnosti byla zvolena lineární závislost a bude počítána podle funkce:

$$q = 0,4 * h + 1$$

kde h ... počet voleb

q ... Váha významnosti kritéria

Porovnávané páry kritérií				Počet voleb	Pořadí	Váha významnosti q
K1 K2	K1 K3	K1 K4	K1 K5	4	1	2,6
	K2 K3	K2 K4	K2 K5	1	3-5	1,4
		K3 K4	K3 K5	3	2	2,2
			K4 K5	1	3-5	1,4
				1	3-5	1,4

Tab. 10

Stanovení vážených indexů a výběr optimální varianty

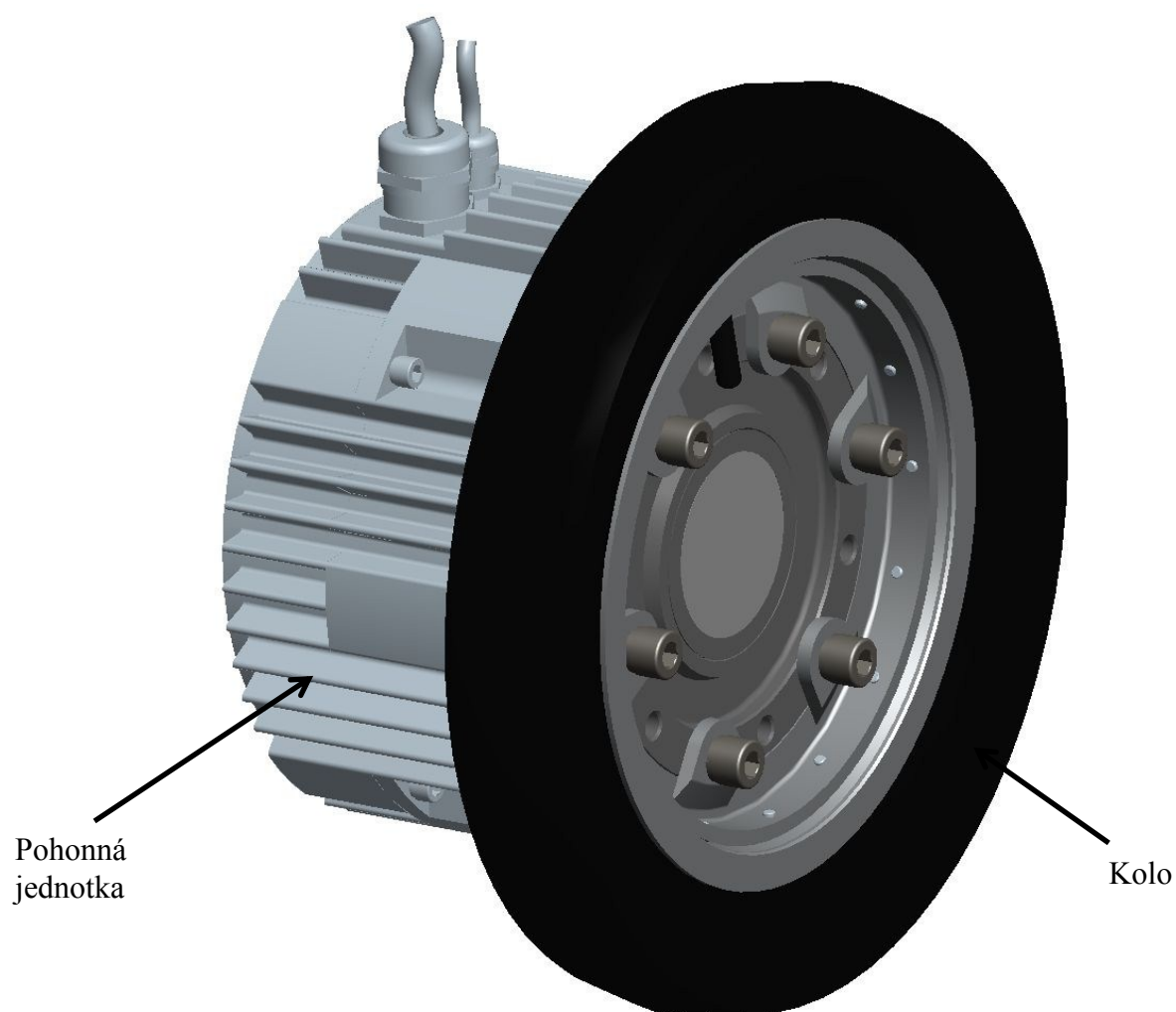
Varianty jsou hodnoceny podle tzv. váženého indexu kritérií. Ten je dán součinem váhy významnosti a předem určené hodnoty kritéria pro danou variantu. Rozhodujícím faktorem je suma vážených indexů.

Varianta	Suma vážených indexů	Pořadí
1	18,6	4.
2	23,4	3.
3	33,4	2.
4	35,8	1.

Tab. 11

Nejvyšší celkový součet vážených indexů dosáhla varianta číslo 4, tedy řešení pohonu kola diskovým motorem Heinzmann a harmonickou převodovkou

5 Konstrukční návrh optimální varianty



Obr. 9

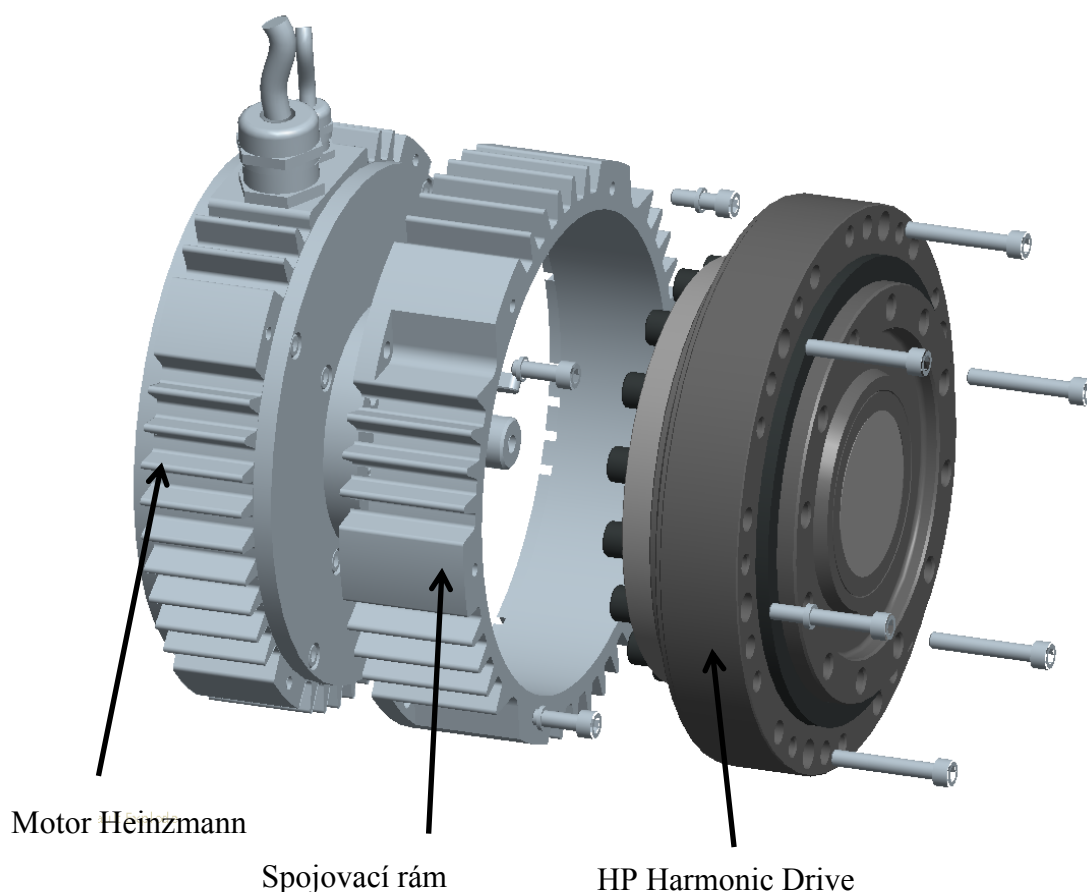
Jako optimální varianta byla na základě hodnotové analýzy vybrána varianta 4 – Pohon kola motorem s harmonickou převodovkou – Diskový motor Heinzmann a harmonická převodovka Harmonic Drive. Tato varianta byla dále rozpracována do podoby na Obr. 9

Navržené řešení se skládá ze dvou na sobě nezávislých podsestav. Pohonné jednotky a samotného kola. Přestože obě dohromady tvoří ucelenou jednotku kola s integrovaným pohonem, je možné jednoduše kolo demontovat a nahradit jiným stejného nebo jiného typu. Toto řešení bylo zvoleno s ohledem na jednoduchou opravitelnost robotu prostou výměnou poškozeného kola, nebo pro lepší přizpůsobení prostředí výměnou kola za vhodnější typ.

Spojení kola s pohonnou jednotkou zajišťuje až 12 šroubů M10. V referenčním řešení na Obr. 9 je použito kolo s ráfkem 203mm o vnějším průměru 300mm, spojené s pohonnou jednotkou šesti šrouby M10x20

Připojení celého kola na rám robotu je řešeno přes přírubu na motoru a s využitím osazení na skříní motoru. Pro spojení slouží čtyři šrouby M6 na roztečné kružnici Ø198mm, respektive tvořící čtverec o straně 140mm. Spojení bylo navrženo za předpokladu celkové hmotnosti robotu 300kg a maximálním zatížení na kolo 100kg. Pro tuto hmotnost byl spoj početně zkontrolován. V případě požadavku na vyšší nosnost robotu by bylo nutné spojení na rám robotu přestavět a řešit přes spojovací rám pohonné jednotky.

5.1 Konstrukce pohonné jednotky



Obr. 10

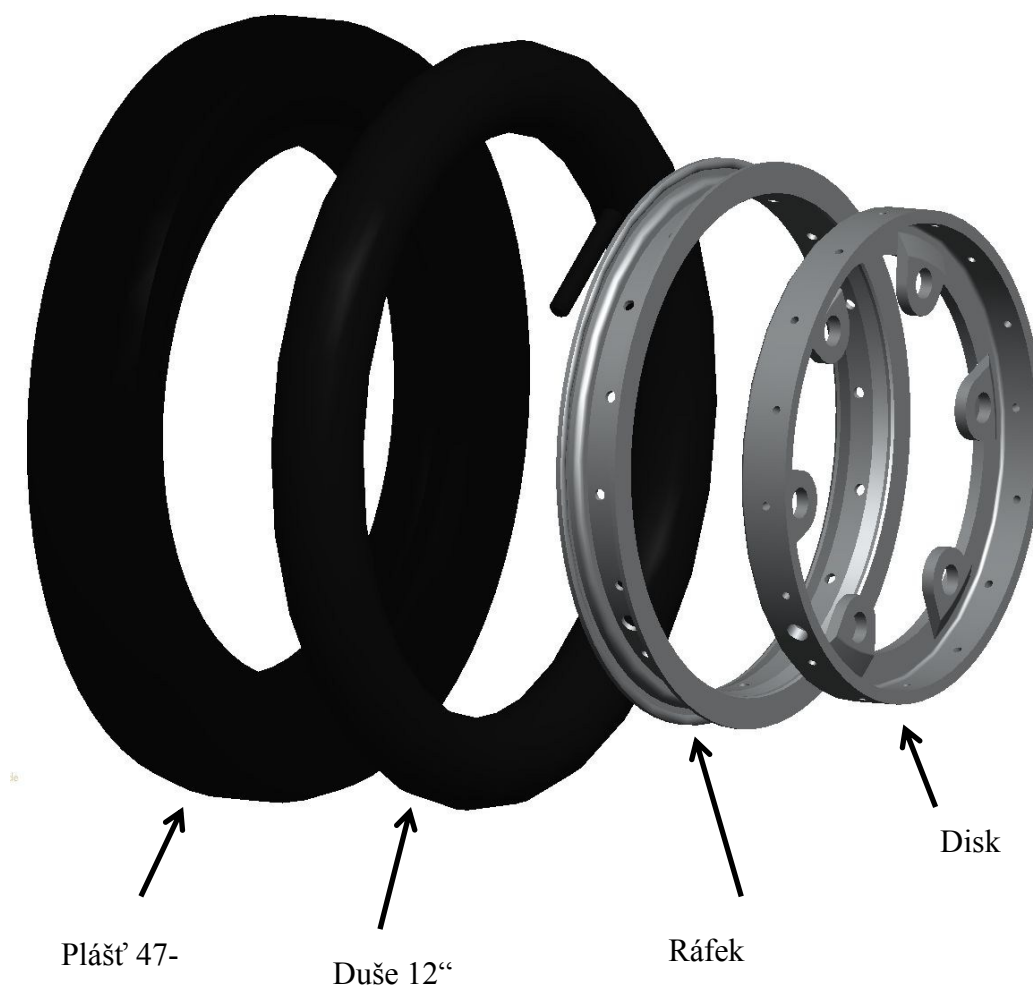
Podsestava pohonné jednotky se skládá ze tří hlavních částí. Diskového motoru Heinzmann SL-EC 120-11B HZM (volba viz výpočet v další kapitole), harmonické převodovky Harmonic Drive CPU-M 45-50 a jednoduchého spojovacího rámu.

Motor Heinzmann SL-EC 120-11B HZM je bezkomutátorový stejnosměrný diskový motor s jednostranným statorem i rotorem. Zpětnou vazbu řídicímu systému zajišťují hallové sondy, v konstrukci jsou rovněž tepelné čidla kvůli kontrole přehřátí motoru. Výstupem motoru je hřídel Ø19mm s drážkou pro pero 6x6x25mm. Pro montáž na konstrukci složí čtyři montážní otvory M6x12 na obou stranách vnějšího obvodu motoru.

Harmonická převodovka Harmonic Drive CPU-M 45-50 je převodovka hříčkového typu bez průchozí duté hřídele a se zabudovaným ložiskem se zkříženými válečky. Toto ložisko bude s výhodou využito, jako hlavní nosné ložisko celého kola což se projeví pozitivně na zjednodušení celé konstrukce kola. Ve snaze o minimalizaci šířky pohonné jednotky byla volena převodovka se stejným průměrem vstupního otvoru jako je průměr hřídele motoru díky čehož je možné tyto dva díly spojit přímo, bez spojovacího mezikusu. Nejmenší převodovka s vhodným průměrem otvoru však je až velikost 45, která je z hlediska krouticího momentu silně předimenzovaná což se projeví její nižší účinností. Na druhou stranu předimenzování by mělo přinést delší životnost a především mnohem vyšší odolnost zabudovaného ložiska. Montáž převodovky k rámu je provedena pomocí šestice šroubů M6 přes montážní otvory na vnější části převodovky. Pro montáž kola slouží 12 otvorů M10 na vnitřní přírubě převodovky.

Spojovací rám je tvořen jednoduchým hliníkovým mezikružím a slouží ke spojení motoru a převodovky. Zároveň však uzavírá a utěšňuje vnitřní prostor pohonné jednotky a tím přináší vyšší odolnost vůči vlhkosti a prachu.

5.2 Návrh kola



Obr. 11

Protože kolo je řešeno jako výměnné s možností použití různých typů, není jeho konstrukce neměnně určena. Jediné v čem se musí všechna kola shodovat je část sloužící k montáži na motor. Tu tvoří vnitřní osazení na $\varnothing 155\text{mm}$ o délce 5mm, zachycující radiální síly, a montážní otvory pro šrouby M10 přenášející krouticí moment a případné axiální síly. Příruba pohonné jednotky umožňuje montáž až 12 šrouby.

Referenční řešení (na Obr. 11) bylo řešeno se snahou o maximální jednoduchost a adaptaci běžných cyklistických dílů (což se projeví příznivě na ceně kola). Základ tvoří cykloráfek Remerx o průměru 203mm a šířce 21mm [12]. Jako většina cyklistických ráfků je i tento tvořen pro spojení s nábojem kola pomocí výpletových drátů (špic). Připojení k pohonné jednotce ale takovou konstrukci neumožňuje, proto bylo voleno jiné řešení, kdy jsou špice nahrazeny vloženým hliníkovým diskem. Ten ráfek jednak spojuje s převodovkou, a jednak

jej vyztužuje. Spojení mezi ráfkem a diskem zajišťují šrouby přes otvory původně určené pro špice. V případě ráfku 203mm to je 16xM4x8.

Na ráfek sestaveného kola se již jen nasadí veloduše s velopláštěm, zcela identicky jako u běžných jízdních kol. Pro ráfek 203mm je vhodná velikost duše 12". Pláště se vyrábějí v různých šířkách a s různými vzorky. Ve velikosti 203mm jsou to nejčastěji šířky 47-62mm. V referenčním návrhu byla použita základní šířka 47mm.

S vhodnou volbou velikostí pláště ale byl zjištěn závažný problém plynoucí z nedostatečných údajů ze strany výrobců plášťů. Protože kolo bude značně zatěžováno jak vahou robota, tak vysokým krouticím momentem, je důležité zvolit plášť vhodného rozměru. Bohužel, údaje o povoleném zatížení a krouticím momentu výrobcí neuvádějí a není možné je spolehlivě zjistit jiným způsobem. V případě realizace kola by tak bylo nutné praktickou zkouškou ověřit, zda zvolené pláště vydrží provozní zatížení nebo je nutné zvolit pláště větší.

Konstrukční návrh optimální varianty byl výkresově zpracován, výkresy jsou součástí příloh.

6 Výpočtová část:

6.1 Výkon a krouticí moment pohonné jednotky

Předběžný výpočet výkonu motoru

Na základě předběžného výpočtu výkonu motoru bude zvolena konkrétní velikost a provedení motoru a k němu odpovídající harmonická převodovka (HP). Kontrola vůči skutečným parametrům vybraných jednotek bude provedena následně.

Jako vstupní hodnoty byly použity krouticí moment a rychlost pohybu robota z požadavkového listu. Ve výpočtu je uvažován průměr kola $d=300\text{mm}$.

6.1.1 Předběžný výpočet výkonu motoru		
$v=3\text{km/h} = 0,833\text{m/s}$ $d=0,3\text{m}$	$\omega = \frac{2v}{d}; n_k = \frac{v}{\pi \cdot d} \cdot 60 \quad (6.1.1.1)$ $\omega = \frac{2 \cdot 0,833}{0,3}; n_k = \frac{0,833}{\pi \cdot 0,3} \cdot 60$	$\omega=5,55 \text{ s}^{-1}$ $n_k=53 \text{ ot/min}$
$M_k=75\text{Nm}$ (trvalý moment na kole) $\eta_r=0,75$ (nom. účinnost HP) [13, str.428]	$P_p = \frac{M_k \cdot \omega}{\eta_r}$ $P_p = \frac{75 \cdot 5,55}{0,75} \quad (6.1.1.2)$	$P_p=555,5\text{W}$

Na základě předběžného výpočtu volíme nejbližší vyšší diskový motor a tím je typ **Heinzmann SL-EC 120-11B HZM** s nominálním výkonem 550W při 1500 ot/min a 800W při 3000 ot/min [9, str. 10]

6.1.2 Výpočet ideálního převodového poměru HP při nominálních ot. motoru		
$n_m=3000\text{ot/min}$ $n_k=53\text{ot/min}$	$i_i = \frac{n_m}{n_k} \quad (6.1.2.1)$ $i_i = \frac{3000}{53}$	$I_i=56,5$

Z konstrukčního hlediska byla zvolena HP typu Harmonic Drive CPU-M ve velikosti 45. V dané velikosti je tato převodovka vyráběna s převodovými poměry 50, 80, 100, 120 a 160. Byla zvolena převodovka s převodovým poměrem 50, celým označením Harmonic Drive CPU-M 45-50. [10, str. 54]

Kontrola parametrů pohonné jednotky

Skutečná účinnost HP silně závisí na skutečném zatížení převodovky. Bude vypočtena skutečná hodnota účinnosti pro trvalý a maximální krouticí moment a následně z nich skutečný požadovaný moment na motoru, který bude porovnán s nominálním a maximálním momentem na motoru.

Výpočet účinnosti převodovky bude proveden dle katalogu výrobce [13].

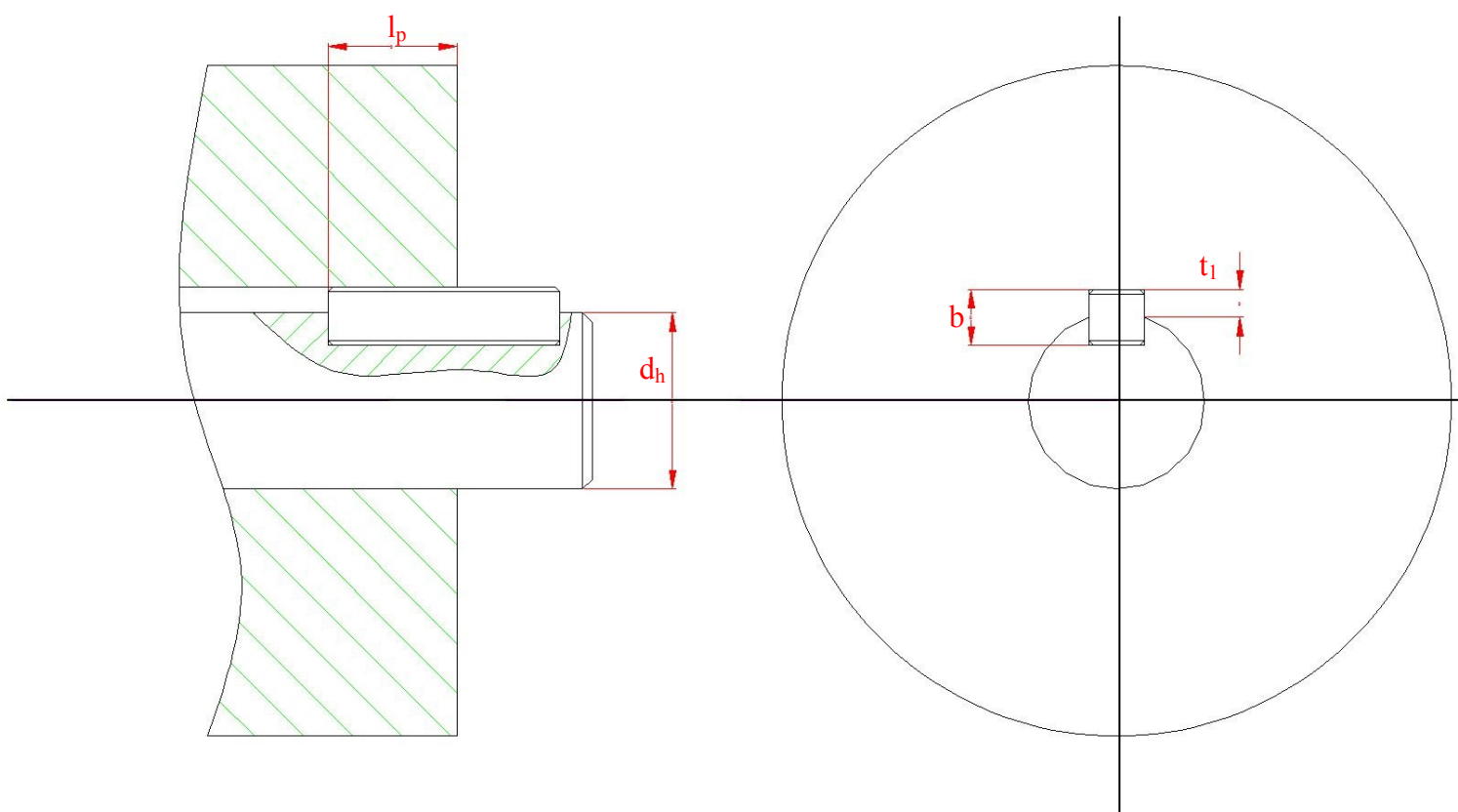
6.1.3 Skutečná účinnost HP při trvalém krouticím momentu		
$M_k=75\text{Nm}$ $M_r=176\text{Nm}$ [10] (nom. moment HP)	$V = \frac{M_k}{M_r}$ $V = \frac{75}{176}$	(6.1.3.1) [13, 421.2] $V=0,426$
$K=0,86$ [13, str.421] (koef. dle V) $\eta_r=75\%$	$\eta_l = K \cdot \eta_r$ $\eta_l = 0,86 \cdot 75\%$	(6.1.3.2) [13, 421.3] $\eta_l=64,5\%$
6.1.4 Skutečná účinnost HP při maximálním krouticím M		
$M_{kmax}=185\text{Nm}$ (max. moment na kole) $M_r=176\text{Nm}$	$V = \frac{M_k}{M_r}$ $V = \frac{185}{176}$	(6.1.4.1) [13, 421.2] $V=1,05$
$K=1$ (Koef. dle V) $\eta_r=75\%$ (nom. účinn.)	$\eta_l = K \cdot \eta_r$ $\eta_l = 1 \cdot 75\%$	(6.1.4.2) [13, 421.3] $\eta_{lmax}=75\%$
6.1.5 Požadovaný trvalý krouticí moment na motoru		
$M_m=2,5\text{Nm}$ [9] (nom. moment na motoru) $M_k=75\text{Nm}$ (trvalý M na kole) $i=50$ $\eta_l=64,5\%$	$M_p = \frac{M_k}{i \cdot \eta_l}$ $M_p = \frac{75}{50 \cdot 0,645}$	(6.1.5.1) $M_p=2,326 < M_m$ Vyhovuje
6.1.6 Požadovaný maximální krouticí moment na motoru		
$M_{mmax}=10\text{Nm}$ [9] (max. moment na motoru) $M_{kmax}=185\text{Nm}$ (max moment na kole) $i=50$ $\eta_{lmax}=75\%$	$M_{pmax} = \frac{M_{kmax}}{i \cdot \eta_{lmax}}$ $M_p = \frac{185}{50 \cdot 0,75}$	(6.1.6.1) $M_{pmax}=4,93 < M_{mmax}$ Vyhovuje

Krouticí moment zvolené sestavy pohonné jednotky vyhovuje požadovaným parametrům.

6.2 Kontrola spojení mezi motorem a převodovkou – Hřídelového pera

Spojení mezi motorem a převodovkou zajišťuje standardní hřídelové pero 6x6x25mm. Z důvodu minimalizace délky sestavené pohonné jednotky však je hřídel motoru zasunuta do těla převodovky mnohem hlouběji než konstruktéři motoru uvažovali. Praktický důsledek je takový, že hřídel přesahuje délku náboje převodovky a větší část pera je mimo drážku náboje. Do drážky zasahuje pero pouze v délce 13mm. Rovná otlačovaná část pera má délku $l' = 10\text{mm}$.

Předmětem početní kontroly bude ověření, zda i takto zkrácené pero dokáže spolehlivě přenášet maximální provozní krouticí moment. Kontrola bude provedena dle [14], a sice kontrolou na otlačení pera a na stříh pera.



6.2.1 Kontrola na otláčení		
$M_{pmax}=4,93Nm$ $=4,93 \cdot 10^3 Nmm$ $d_h=19mm$ $t_1=2,5mm$	$F_2 = \frac{M_{pmax}}{\frac{d_h}{2} + \frac{t_1}{2}}$ $F_2 = \frac{4,93 \cdot 10^3}{\frac{19}{2} + \frac{2,5}{2}}$	(6.2.1.1) $F_2=458,6N$
$p_{D2}=100MPa$ [14, str. 80] $l_p=10mm$	$p_2 = \frac{F_2}{l_p' \cdot t_1}$ $p_2 = \frac{458,6}{10 \cdot 2,5}$	(6.2.1.2) $p_2=18,344MPa$ $p_2 < p_{D2}$ Vyhovuje
6.2.2 Kontrola na střih		
$M_{mmax}=4,93Nm$ $=4,93 \cdot 10^3 Nmm$ $d_h=19mm$	$F = \frac{M_{mmax}}{\frac{d_h}{2}}$ $F = \frac{4,93 \cdot 10^3}{\frac{19}{2}}$	(6.2.2.1) $F=518,9N$
$\tau_{DS}=30MPa$ [14] $l_p=13mm$ $b=6mm$	$\tau_s = \frac{F}{l_p \cdot b}$ $\tau_s = \frac{518,9}{13 \cdot 6}$	(6.2.2.2) $\tau_s=6,65MPa$ $\tau_s < \tau_{DS}$ Vyhovuje

Pero požadovaný krouticí moment přenese

6.3 Kontrola pevnosti šroubů uchycujících kolo k rámu robotu

Kolo je k rámu robotu uchyceno za přírubu motoru pomocí čtyř šroubů M6 na roztečné kružnici Ø198mm, respektive tvoří vrcholy čtverce o délce hrany 140mm.

Spojení kola s rámem je za provozu namáhána čtyřmi zdroji sil. První dvě tvoří síly od hmotnostního zatížení kola a projevují se jednak jako posouvající síla působící ve svislém směru a pak jako klopný moment. Třetí složka je od krouticího momentu a snaží se kolo otočit okolo jeho osy. Čtvrtá složka je tvořena silami vznikajícími za jízdy v terénu.

Svislá posouvající síla je zcela zachycena osazením na rámu motoru, ve výpočtu šroubů se tak nezahrne. Klopný moment se projeví přídavnou osovou silou ve spodním páru šroubů. Krouticí moment kola se z hlediska dimenzování šroubů projeví nejvíce. Bude zachycen třením mezi přírubou motoru a konstrukcí robotu. Třecí síla je vyvozena osovou silou ve šroubech. Poslední složku není možné na rozdíl od ostatních jednoduše vyjádřit, ve výpočtu ji tak nahradíme požadavkem na zvýšený koeficient bezpečnosti.

Ve výpočtu předpokládáme zatížení kola hmotností 100kg (1000N) a plným krouticím momentem 185Nm. Spojení bude provedeno šrouby o třídě pevnosti 8.8

6.3.1 Osová síla od klopného momentu		
$l=170\text{mm}$ (šířka kola) $s=140\text{mm}$ (rozteč šroubů) $F_z=1000\text{N}$	$F_{ok} = \frac{F_g \cdot l}{2s}$ $F_{ok} = \frac{1000 \cdot 170}{2 \cdot 140}$	(6.3.1.1) $F_{ok}=607,1\text{N}$
6.3.2 Osová síla zachycující krouticí moment pomocí tření		
$M_{kmax}=185\text{Nm}$ $d_s=198\text{mm}$	$F_t = \frac{M_{kmax}}{2d_s}$ $F_t = \frac{185}{2 \cdot 0,198}$	(6.3.2.1) $F_t=467,2\text{N}$
$k=1,3$ (koef. bezp. třecí vazby) [14] $f=0,35$ (koef. smyk. tření) [15]	$F_{ot} = \frac{k \cdot F_t}{f}$ $F_{ot} = \frac{1,3 \cdot 467,2}{0,35}$	(6.3.2.2) $F_{ot}=1735,2\text{N}$
6.3.3 Maximální osová síla		
$F_{ok}=607,1\text{N}$ $F_{ot}=1735,2\text{N}$	$F_{om} = F_{ok} + F_{ot}$ $F_{om} = 607,1 + 1735,2$	(6.3.3.1) $F_{om}=2342,3\text{N}$
6.3.4 Pevnostní kontrola		
$F_{om}=2342,3\text{N}$ $d_3=4,773\text{mm}$	$\sigma = \frac{F_{om}}{\pi \cdot \frac{d_3^2}{4}}$ $\sigma = \frac{2342,3}{\pi \cdot \frac{4,773^2}{4}}$	(6.3.4.1) $\sigma=130,912\text{MPa}$
$d_2=5,35\text{mm}$ $Ph=1\text{mm}$ $f_z=0,15$	$\tau = \frac{F_{om} \cdot \tan(\text{atan}(\frac{Ph}{\pi \cdot d_2}) + \text{atan}(\frac{f_z}{\cos 30^\circ})) \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}}$ $\tau = \frac{2342,3 \cdot \tan(\text{atan}(\frac{1}{\pi \cdot 5,35}) + \text{atan}(\frac{0,15}{\cos 30^\circ})) \cdot \frac{5,35}{2}}{\frac{\pi \cdot 4,773^3}{16}}$	(6.3.4.1) $\tau=69,003\text{MPa}$
$Re=640\text{MPa}$	$k_s = \frac{Re}{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}$ $k_s = \frac{640}{\sqrt{130,912^2 + 4 \cdot 69,003^2}}$	(6.3.4.3) $k_s=3,364$

Pevnostní kontrola šroubů vyšla s koeficientem bezpečnosti 3,364 v okamžiku největšího zatížení krouticím momentem. Koeficient bezpečnosti dokáže kompenzovat další síly vznikající při jízdě.

7 Závěr

Na základě rozboru problematiky bylo vybráno několik možných variant řešení a jedno z nich, vybrané hodnotovou analýzou jako nejvhodnější bylo dále rozpracováno a početně ověřeno. Navržené kolo splňuje všechny požadavky a mohlo by tak být použito jako konstrukčně nenáročný modulární systém pohonu robotu střední velikosti ve vnitřním i vnějším prostředí.

Přesto by však bylo možné pro případ realizace návrh ještě dále rozvinout. Poměrně slabým místem návrhu zůstává vysoká hmotnost daná především těžkou, předimenzovanou převodovkou, která má navíc v daných podmínkách dosti nízkou účinnost. Její použití plyne z předem stanovených požadavků, jejich změnou dle skutečných podmínek provozu by však teoreticky bylo možné dosáhnout hmotnostně lepšího řešení.

Problematická je rovněž rychlost robotu. Přestože navržené řešení plně splňuje současný rychlostní požadavek 3km/h, zcela nedostačuje pro původní vyšší žádanou rychlost. Pro její dosažení by bylo nutné použít výkonnější typ motoru, který by ale v současnosti byl neúměrně velký a těžký. Řešením by bylo snížit žádaný výstupní moment a použít nižší převod což ale nemusí robotu dostačovat. Vzhledem k vývoji elektrických motorů je dostupnost vhodných motorů pravděpodobně jen otázkou času, v současnosti však dostupné nejsou.

Naopak jako slibné se zdá být řešení výměnných kol. V návrhu bylo použito obyčejné, nejjednodušší možné řešení s ohledem především na cenu, v principu ale je možné vytvořit a použít kolo téměř libovolného typu, včetně všesměrových kol, kombinace kol a nohou či téměř libovolného jiného specializovaného typu, dle požadavku prostředí. Jediným omezením je příruba převodovky, přes kterou se provádí montáž, ta je však velmi robustní. V praxi tak nic nebrání plně univerzálnímu použití pohonné jednotky na široké škále robotů.

Jediné současné výrazné omezení univerzálnosti je systém upnutí k rámu robotu. Návrh počítá s využitím existující příruby na motoru v zájmu co největšího snížení hmotnosti, uvažovaná maximální hmotnost robotu je limitována na 400kg. Pokud by byla požadována nosnost vyšší, což z hlediska nosných ložisek možné je, bylo by zapotřebí uchycení na rám robotu přepracovat.

8 Seznam použité literatury

[1] *Wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2011-01-01]. Wheel hub motor. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wheel_hub_motor>.

[2] *Wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2011-01-01]. Lunokhod programme. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_programme>.

[3] *Wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2011-01-01]. Lunar rover. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_rover_%28Apollo%29>.

[4] *E-Traction* [online]. 2009 [cit. 2011-02-12]. SM350. Dostupné z WWW: <<http://www.e-traction.com/SM350.htm>>.

[5] *E-Traction* [online]. 2009 [cit. 2011-02-12]. System Performance. Dostupné z WWW: <<http://www.e-traction.com/Downloads/System%20Performances.pdf>>.

[6] *Kollmorgen* [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. DC Torque Motor. Dostupné z WWW: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/dc_motors/dc_torque_motors/dc_torque_motors/>.

[7] *Kollmorgen* [online]. 2005 [cit. 2011-02-12]. Direct Drive DC Torque Motors. Dostupné z WWW: <http://www.kollmorgen.com/uploadedfiles/Files/Document/Direct_Drive_DC_Torque_Motors_Catalog.pdf>.

[8] *Harmonic Drive* [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. Product Description CHA. Dostupné z WWW: <http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/pdf/GK_2011_2012/de_en/servoprodukte/cha-150-177.pdf>.

[9] *Heinzmann* [online]. 2007 [cit. 2011-02-12]. Brushless DC Motors. Dostupné z WWW: <http://www.heinzmann.de/en/component/docman/doc_download/1325-product-catalogue-sl>.

[10] *Harmonic Drive* [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. Product Description CPU. Dostupné z WWW: <http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/pdf/GK_2011_2012/de_en/units/cpu-52-69.pdf>.

- [11] Skařupa, Jiří. *Metodika konstruování*. Ostrava : Skripta VŠB Ostrava, 1993.
- [12] *Remerx* [online]. 2010 [cit. 2011-04-30]. RMX 21. Dostupné z WWW:
<<http://www.remerx.cz/rmx-21/>>.
- [13] *Engineering Data* [online]. Limburg : Harmonic Drive AG, 2010 [cit. 2011-02-24].
Dostupné z WWW:
<http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/pdf/GK_2011_2012/de_en/gk-387-526.pdf>.
- [14] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře : Části spojovací*. Ostrava : VŠB-TU, 2009. 90 s.
- [15] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky. Úvaly* : Albra, 2008. 914 s.

9 Seznam příloh

Výkresy:

DOL273-BP-02-01	Kolo s int. pohonem	- Sestava
DOL273-BP-02-02	Pohonná jednotka	- Podsestava
DOL273-BP-03-03	Kolo – <i>Ráfek 203mm</i>	- Podsestava
DOL273-BP-04-03-01	Kolo – kusovník	- Kusovník
DOL273-BP-03-04	Disk – <i>203mm</i>	- Výrobní výkres